

К СИНТЕЗУ УПРАВЛЯЮЩИХ УСТРОЙСТВ РЕГУЛЯТОРОВ МОЩНОСТИ ДУГОВЫХ ЭЛЕКТРОПЕЧЕЙ ПО ЖЕЛАЕМЫМ РЕГУЛИРОВОЧНЫМ ХАРАКТЕРИСТИКАМ

Иванушкин В.А.¹, Исаков Д.В.¹, Миронов С.Е.², Сарапулов Ф.Н.²

¹ Уральский Федеральный университет (филиал), Нижний Тагил, РФ, atps_nt@mail.ru

² Уральский Федеральный университет, Екатеринбург, РФ, sarapulovfn@yandex.ru

Аннотация: Рассмотрен способ синтеза управляющих устройств регуляторов мощности дуговых электропечей прямого действия на основе единичных типовых нелинейных функций.

Ключевые слова: регулятор мощности, единичные нелинейные функции.

С применением в автоматических регуляторах мощности дуговых электропечей промышленных контроллеров (ПК) и современных частотно-управляемых электроприводов переменного тока появились новые возможности улучшения качества регулирования электрического режима и основных технико-экономических показателей работы печей.

Известно, что качество системы регулирования электрического режима печи во многом определяется регулировочными характеристиками (зависимость установившейся скорости перемещения электрода в функции сигнала рассогласования) привода перемещения электрода. Реализация желаемых регулировочных характеристик в действующих регуляторах традиционно осуществлялась в рамках возможностей системы управления электродвигателем перемещения электрода (системы управления электропривода - СУЭП). При данном подходе решение указанной задачи сводилось к применению отрицательных нелинейных обратных связей по координатам электродвигателя (скорости, напряжению питающего преобразователя и т.п.), а также к включению в прямой канал функциональных нелинейных преобразователей (в основном типа зоны нечувствительности). Такой подход неизбежно приводил к необходимости создания специализированных электроприводов перемещения электродов, решающих две задачи: управление собственно координатами электропривода и формирование закона управления объектом (релейный, пропорциональный, пропорционально-релейный или более сложный).

В настоящее время при новом проектировании и модернизации действующих исполнительных механизмов регуляторов мощности дуговых сталеплавильных печей с использованием

четырёхквadrантных электроприводов (например, комплектных частотно-управляемых) целесообразно решение задачи формирования желаемых регулировочных характеристик, адаптированных к различным периодам плавки, возложить на промышленный контроллер (ПК). В этом случае комплектный регулируемый электропривод рассматривается разработчиком управляющего устройства автоматического регулятора дуги как элемент, относящийся к неизменяемой части объекта регулирования, вследствие чего полностью отпадает необходимость внесения, каких либо необходимых по требованиям технологии изменений в структуру и алгоритмы СУЭП. Кроме того, в данном случае разработчик управляющих устройств сосредоточивает главное внимание не на управлении координатами электропривода, а на реализации алгоритмов управления конкретной стадией технологического процесса.

При данном подходе возникает задача выбора способов задания и синтеза различных регулировочных характеристик (как симметричных, так и асимметричных) управляющих устройств регуляторов, адаптированных к различным технологическим периодам процесса плавки. В работе [1] изложены основные подходы к формированию энергоэффективных алгоритмов управления электрическим режимом дуговых сталеплавильных печей прямого действия с учетом возможностей современных ПК. Там же приведены желаемые регулировочные характеристики автоматических регуляторов мощности для различных периодов плавки, содержащие кусочно-линейные и кусочно-постоянные участки. В [2] предложен способ аналитического описания подобных нелинейных функций регуляторов с использованием функций типа $\text{sign}(X)$ и модуля аргумента - $\text{abs}(X)$, требующий предварительного расчленения исходной нелинейной функции на элементарные типовые составляющие и математическое описание каждой из них. Кроме того, при формировании желаемых регулировочных характеристик регуляторов возникает задача реализации нетиповых нелинейных функций. Например, при оценке и ликвидации остаточного рассогласования, реализации нереверсивного

регулирования в период прорезки колодцев, зоны нечувствительности с установкой на пьедестал, выделения полярности рассогласования, сдвига зоны нечувствительности в периоды прорезки колодцев и расплавления шихты и т.п.

Практика показывает, что при использовании указанного способа типовые и нетиповые нелинейности характерные для регуляторов мощности дуговых печей удается реализовать при использовании единичных типовых нелинейных функций. Предлагаемая методика синтеза предусматривает последовательное выполнение следующих этапов:

1. Задание желаемой характеристики управляющего устройства в форме графика (например, в виде, показанном на рис.1), содержащей кусочно-линейные и кусочно-постоянные участки, желаемыми координатами узловых точек (настроечными параметрами a_i, b_i).

2. Разложение (декомпозиция) исходной характеристики в композицию более простых составляющих (симметричных элементарных типовых нелинейностей).

3. Аналитическое описание каждой составляющей с использованием моделей базовых элементарных статических и динамических нелинейных единичных функций (табл. 1).

4. Приведение единичных элементарных характеристик в реальные масштабы по обеим осям (поскольку максимальный уровень выходного сигнала реальных составляющих желаемой характеристики не является единичным, а интервал их действия имеет конкретные значения).

5. Формирование блочно-модульной структуры управляющего устройства (рис.2) и соответственно алгоритмических схем ее модулей.

В табл. 1 представлены математические модели основных статических и динамических элементарных единичных нелинейностей, используемых при формировании заданных характеристик (рис.1) регулирующего устройства электрохимического регулятора мощности дуговой печи с интегрирующим исполнительным механизмом переменной скорости.

Блочно-модульная структура управляющего устройства показана на рис.2. Блок состоит из двух субблоков I и II формирования сигналов управления при положительных и отрицательных рассогласованиях (соответственно на подъем и опускание электрода фазы печи), субблока III индикации знака рассогласования, а также субблока IV непрерывного контроля остаточного рассогласования и оценки качества регулирования.

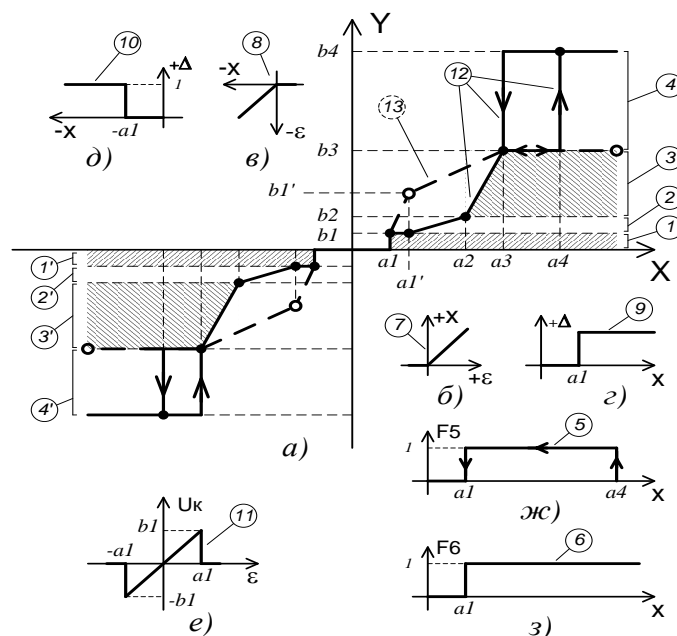


Рис.1. Статические характеристики ФНП (а) с элементарными нелинейными составляющими (1 - 4) и модулей его блочно-модульной структуры (рис.2): б, в (7,8) - выделения положительного и отрицательного рассогласований; г, д (9,10) - индикации знака рассогласования; ж, з (5,6) – реализация непереворачиваемого регулирования; е (11) – контроль остаточного рассогласования

Таблица 1

Элементарные единичные нелинейности

№п/п	Название нелинейности	Математическое описание (модель)
1	Трехпозиционная без зон неоднозначности	$F(X) = 1/2 [\text{sign}(X-a) + \text{sign}(X+a)]$
2	Ограничение по выходу с зоной нечувствительности	$F(X) = 1/2(X+b - X-b - X+a + X-a)$, где $b > a$
3	Трехпозиционная с зонами неоднозначности	$F(X) = 1/2 [\text{sign}(X-a \text{ sign } dX/dt) + \text{sign}(X + b \text{ sign } (X + b \text{ sign } dX/dt))]$, где $b > a$.

4	Выделение положительного рассогласования ε	$X(\varepsilon) = 1/2 (\varepsilon + \varepsilon)$
5	Выделение отрицательного рассогласования ε	$X(\varepsilon) = 1/2 (\varepsilon - \varepsilon)$
6	Зона нечувствительности	$F(X) = \varepsilon - 1/2(X+a - X-a)$
7	Ограничение по выходу	$F(X) = 1/2(X+a - X-a)$
8	Трехпозиционная без зон неоднозначности инверсная	$F(X) = -1/2 [\text{sign}(X-a) + \text{sign}(X+a)]$

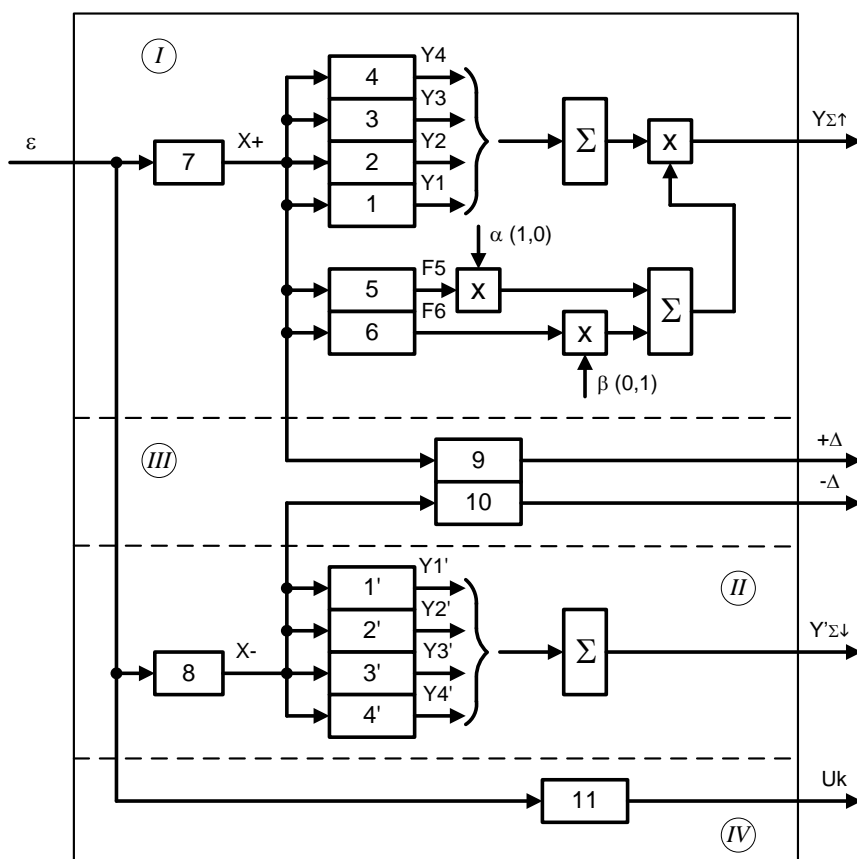


Рис.2. Блокно-модульная структура управляющего устройства: *I*, *II* - субблоки формирования сигналов управления при положительных и отрицательных рассогласованиях; *III* - субблок индикации знака рассогласования; *IV* - субблок непрерывного контроля остаточного рассогласования и оценки качества регулирования

Субблок *I* содержит модули 1–7, формирующие управляющие воздействия на привод перемещения электрода фазы при положительных рассогласованиях (модуль 7 рис.2, характеристика рис.1,б) в режимах реверсивного и нереверсивного (прорезка колодцев) регулирования. При этом режим реверсивного регулирования реализуется с помощью модулей 1–4 (рис.1а, составляющие 1, 2, 3, 4) и модуля 6 (рис.2, характеристика рис.1, з), при условии, что внешние сигналы $\alpha = 0$, $\beta = 1$. В режиме нереверсивного регулирования (за исключением длительных коротких замыканий) реализуется нетиповая комбинированная нелинейная характеристика (рис.1а, траектория – 0

→ $a_4 \rightarrow 6_4 \rightarrow a_3 \rightarrow 6_3 \rightarrow 6_2 \rightarrow 6_1 \rightarrow a_1 \rightarrow 0$) помощью модулей 1, 2, 3, 4 и модуля 5 (характеристика рис.1, ж). Условием установки данного режима является наличие инверсных значений внешних сигналов α и β . С помощью модуля 5 при снижении положительного рассогласования обеспечивается автоматический переход с релейного регулирования на пропорциональное.

Субблок *II* содержит модули 8 (рис.2, рис.1,в) и 1'–4' обеспечивающих формирование желаемых управляющих при отработке регулятором отрицательных сигналов рассогласования.

Субблок III содержит модули 9 и 10 и вырабатывает сигналы: $+A$ – выход регулируемого параметра за верхнюю границу зоны нечувствительности (рис.1з); $-A$ – выход регулируемого параметра за нижнюю границу зоны нечувствительности (рис.1д). Субблок IV содержит один модуль 11 реализующий нетиповую нелинейную статическую характеристику (рис.1,е).

Алгоритмические структуры всех модулей субблоков сформированы на основе математических моделей, приведенных в табл.1. В табл.2 показаны единичные нелинейности, используемые при формировании модулей субблоков I – IV, а также координаты их настроечных параметров и коэффициенты приведения.

Таблица 2

Параметры и коэффициенты приведения единичные нелинейности модулей

№ модуля	№№ нелинейностей	Абсциссы	Ординаты	Коэффициент приведения
1	1	$a1$	$b1$	$b1$
2	2	$a1, a2$	$b1, b2$	$b2 - b1 / a2 - a1$
3	2	$a2, a3$	$b2, b3$	$b3 - b2 / a3 - a2$
4	3	$a3, a4$	$b3, b4$	$b4 - b3$
5	3	$a1, a4$	1	1
6	1	$a1$	1	1
7	4	0	0	1
8	5	0	0	1
9	1	$a1$	1	1
10	8	$a1$	1	1
11	7 + 8	$a1$	$b1$	$b1$

Отметим, что указанные в табл.1 модели позволяют формировать желаемые регулировочные характеристики автоматических регуляторов с интегрирующими исполнительными механизмами постоянной скорости при релейном управлении. Целесообразность предлагаемого подхода к синтезу управляющих устройств регуляторов мощности дуговых электропечей по желаемым регулировочным характеристикам обусловлена целесообразностью их реализации на базе современных промышленных контроллеров.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

- [1] Иванушкин В.А., Исаков Д.В., Сарапулов Ф.Н., Поздеев С.А., Рабек А.А. Формирование энергоэффективных алгоритмов управления электрическим режимом дуговых сталеплавильных печей // Промышленная энергетика №7, 2015. – С.32-35.
- [2] Иванушкин В.А., Исаков Д.В., Гамов А.В., Сарапулов Ф.Н. К реализации моделей управляющих устройств с заданными регулировочными характеристиками регуляторов мощности дуговых электропечей. Эффективное и качественное снабжение и использование энергии: сб. докл. 6-ой междунар. конф. в рамках специализир. форума «Expo Build Russia» (Екатеринбург, 19 апреля 2017) / науч. ред. Ф.Н. Сарапулов. – Екатеринбург: Издательство УМЦ-УПИ, 2017. – 304 с.